



Programa Centroamericano de Gestión Integral de la Roya del Café

Por una caficultura competitiva, sustentable e incluyente

Guía para la vigilancia de la roya del café (Hemileia vastatrix)



Vigilancia en El Salvador



Vigilancia en Honduras



Vigilancia en Nicaragua

Autores: Jacques Avelino, Edwin Treminio, Fernando Casanoves, Sergio Vílchez, Jeanette Cárdenas, Cristian Lizardo

Septiembre, 2019



Guatemala - Honduras - El Salvador - Nicaragua - Costa Rica - Panamá - República Dominicana



ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. ¿Qué es la vigilancia fitosanitaria? | 2 |
| 3. ¿Cómo se rige la vigilancia fitosanitaria? | 3 |
| 4. Algunos ejemplos de vigilancia fitosanitaria específica | 4 |
| 4.1. La enfermedad del Huanglongbing (HLB) de los cítricos en México | 4 |
| 4.2. La enfermedad de los olivos causada por <i>Xylella fastidiosa</i> en Europa | 5 |
| 4.3. La roya negra del trigo causada por la raza Ug99 y sus derivados | 6 |
| 5. La vigilancia fitosanitaria para la roya del café..... | 7 |
| 5.1. La vigilancia en Colombia | 7 |
| 5.2. La vigilancia en México..... | 7 |
| 5.3. La vigilancia en Costa Rica | 8 |
| 6. Algunos conceptos útiles para la vigilancia de la roya del café..... | 8 |
| 6.1. ¿Cómo medir la intensidad de una enfermedad? | 8 |
| 6.2. ¿Qué medir: severidad o incidencia? | 11 |
| 6.3. ¿Cómo muestrear la intensidad de una enfermedad a escala de una parcela?..... | 12 |
| 6.4. ¿Cuántas plantas, cuantas ramas, cuantas hojas muestrear? | 13 |
| 6.5. Parcelas centinela | 14 |
| 6.6. El concepto de costo-eficiencia | 14 |
| 6.7. Monitoreo secuencial..... | 15 |
| 7. Propuestas para la mejora de la vigilancia de la roya en Centroamérica (optimización) | 15 |
| 7.1. Algunas consideraciones iniciales | 15 |
| 7.2. Cálculo del número de parcelas por monitorear | 17 |
| 7.3. Reducir el número de parcelas por monitorear categorizando las parcelas | 18 |
| 7.4. Ajustando el número de parcelas por monitorear | 19 |
| 7.5. Distribución de las parcelas a nivel territorial..... | 22 |
| 7.6. Retomando los pasos del plan de optimización del monitoreo de la roya del café para actividades de vigilancia | 22 |
| 8. La vigilancia en apoyo a las alertas | 23 |
| 8.1. Nivel de daño económico y umbral económico | 23 |
| 8.2. Pérdidas de producción en cultivos perennes..... | 24 |
| 8.3. Umbrales de alerta en el caso de la roya del café | 25 |
| 9. Referencias | 26 |



1. Introducción

La roya del café, causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, es posiblemente la enfermedad del café más importante (Figura 1). La roya del café está presente en casi todos los países productores de café; sólo Hawái y Australia presumiblemente están libres de la enfermedad. Su poder destructivo es un caso de escuela. Todos los fitopatólogos saben de la destrucción del sector café en Ceilán después de la introducción de la roya en 1869, en una época, claro, en que los fungicidas eran casi desconocidos. Sin embargo, no hay mucha evidencia que indique que la roya del café haya sido un problema grave en la caficultura mundial en los siguientes 140 años, incluso cuando la enfermedad llegó a América Latina, en Brasil, en 1970, posiblemente porque el control químico ya estaba disponible. Esto cambió en 2008, en Colombia, y después en 2012 en América Central, cuando una serie de epidemias sirvió como un cruel recordatorio del poder destructivo de la enfermedad.



Fuente: a) Avelino J, Turrialba-Costa Rica, 2010; b) Merle I, Turrialba-Costa Rica, 2013; c) Rapidel B, Veracruz-México, 2015; d) Avelino J, El Salvador, 2013

Figura 1. a) Hojas de café con lesiones esporuladas, b) hojas severamente infectadas, c) planta joven con alta incidencia de *Hemileia vastatrix*, d) Fuerte defoliación por ataque de roya.



Las epidemias del 2012 han impactado fuertemente la producción de café en América Central, aunque con ciertas diferencias según los países. En el año de la epidemia (2012/13), la producción de la región se redujo en un 10% con respecto a la del año anterior (2011/12). El impacto se sintió más al año siguiente (2013/14), con una reducción de un 20% con respecto a la del 2011/12 (Figura 2). El país más impactado ha sido El Salvador, con una reducción del 56%. Posteriormente, la producción ha estado recuperándose paulatinamente para alcanzar en 2016/17 los niveles del 2011/12. Sin embargo, éste no es el caso de El Salvador cuya producción se mantiene alrededor del 50% de lo que era antes de las epidemias. En Costa Rica, la producción del 2016/17 también está debajo de la producción del 2011/12, con un descenso regular desde el 2012/13. Los impactos en la producción aunados a los efectos de la baja de los precios del café han desembocado en una reducción de la cantidad de mano de obra empleada y de los salarios. Más de 375 000 personas perdieron su empleo en 2012/13 y 2013/14 en Centroamérica. El resultado fue una situación de empobrecimiento en el campo y de crisis alimentaria para unas 130 000 familias (7).

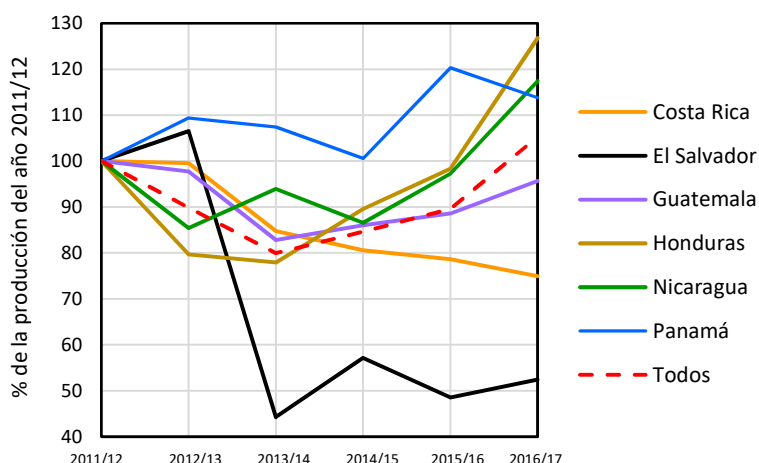


Figura 2. Evolución de la producción de café en Centroamérica con respecto a la producción del 2011/12 previo a las epidemias de roya. Datos de la OIC, consultados el 15/03/2019 en http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics.

La roya tomó la región centroamericana desprevenida, aunque varios signos precursores pudieron manifestarse. Fuertes epidemias de roya ocurrieron en Colombia del 2008 al 2011 con impactos en la producción de un 31% en promedio. Incidencias anormalmente altas aunque focalizadas fueron detectadas en El Salvador y Guatemala desde el 2010 (1, 20). Estos signos no se consideraron con la importancia suficiente, porque posiblemente nadie esperaba epidemias de roya tan intensas, pero estos signos demuestran que sí hay formas de anticipar las crisis basándose en una vigilancia organizada.

El propósito de esta guía es dar a conocer algunos principios generales de la vigilancia y reglas para su aplicación exitosa al caso de la roya del café. La vigilancia debe ser eficiente (práctica, bien fundada técnicamente), y sostenible económicamente para que sus resultados inspiren confianza y que el sistema sea útil y perdure. Varios documentos previos han sido producidos por el Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria que ameritan ser consultados para tener una visión completa de la vigilancia (8-10). En el documento presente se proporciona una información complementaria.

2. ¿Qué es la vigilancia fitosanitaria?

Los programas de vigilancia nacen de las exigencias del comercio internacional de comerciar productos de origen biológico libres de plagas y enfermedades que podrían afectar las plantas, animales y seres humanos, con el fin de evitar su propagación a nivel internacional. La vigilancia “es un proceso oficial mediante el cual se recoge y registra información sobre la presencia o ausencia de una plaga utilizando



encuestas, monitoreo u otros procedimientos” (25). En esta definición se enfatizan las actividades que permiten la detección de plagas (en principio ausentes) en un territorio determinado para certificar, si fuera el caso, que éstas están realmente ausentes de ese territorio. Eso es clave para el comercio internacional.

El caso de la roya es distinto. La roya está presente en casi todas las áreas productoras de café. Por lo tanto, las actividades de vigilancia son para otro propósito: seguir su avance epidemiológico y tomar acciones oportunas para contrarrestar desarrollos peligrosos. Estas actividades entran en el campo del monitoreo que se define como “un proceso oficial continuo para comprobar situaciones fitosanitarias” (25). Para eso se llevan a cabo encuestas de monitoreo que se definen como encuestas “para verificar las características de una población de plagas” (25).

3. ¿Cómo se rige la vigilancia fitosanitaria?

Hay dos acuerdos clave que son el Acuerdo de Aplicación de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias (MSF) de la Organización Mundial del Comercio (OMC) y la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), de la cual la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) está a cargo. La Comisión de Medidas Fitosanitarias (CMF) rige la CIPF. La CMF establece particularmente normas internacionales para medidas fitosanitarias (NIMF) que la OMC reconoce. Entre las normas más importantes sobre la vigilancia está la norma n°6 que describe sus requerimientos, incluyendo los componentes de un sistema nacional de vigilancia (26).

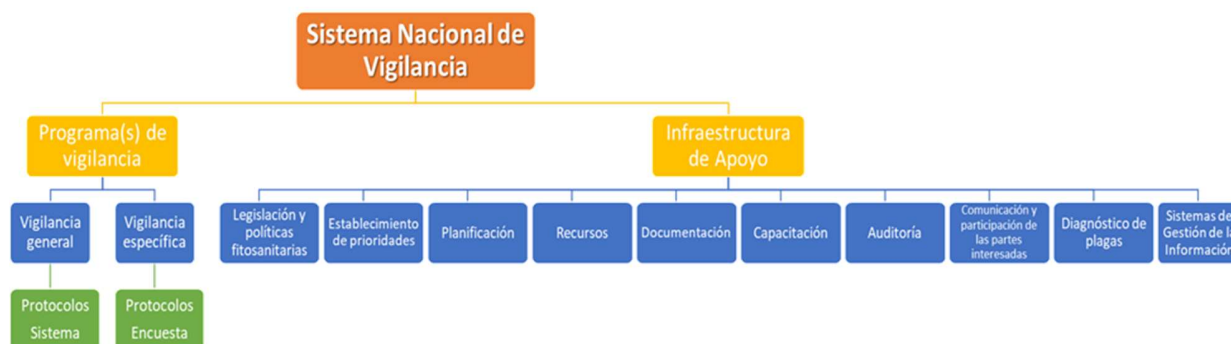
La CIPF es sólo uno de los acuerdos internacionales que se utilizan para el comercio de productos de origen biológico. La CIPF trata de la sanidad vegetal. En el caso de la sanidad animal y zoonosis, la Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE) es la organización de referencia de la OMC. La OIE publica dos Códigos y dos Manuales en relación con los animales terrestres y acuáticos. La Comisión del *Codex Alimentarius*, literalmente código sobre alimentos, es el órgano internacional de referencia en materia de normas alimentarias. El *Codex Alimentarius* reúne todas las normas, códigos y recomendaciones de la comisión. La comisión depende de la FAO y de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estas normas y recomendaciones se aplican a nivel nacional según las necesidades y posibilidades de cada país.

Los programas de vigilancia están a cargo de las Organizaciones Nacionales de Protección Fitosanitaria (ONPF) las cuales pueden delegar en otras, parte de la actividad. La CIPF recomienda que los programas incluyan dos tipos de vigilancia (Figura 3):

- La vigilancia general, que es un proceso por el cual la información sobre plagas y enfermedades de interés en un área definida se recopila a través de múltiples fuentes, sin real límite en la participación. Todo aquél que tenga acceso a información puede potencialmente participar en la vigilancia general, especialmente el sector productor.
- La vigilancia específica que es un proceso por el cual la ONPF obtiene información sobre plagas de interés en un área determinada durante un período definido. En este caso, las ONPF reúnen activamente datos específicos relacionados con estas plagas a través de encuestas que se realizan para determinar las características de la población, para determinar qué especies están presentes o ausentes en un área, o para delimitar un área considerada como afectada o no afectada por la plaga.



En ambos casos, se requiere el desarrollo de protocolos que describan cómo realizar la vigilancia. Los métodos deben basarse en información científica, geográfica y estadística relevante. Esta guía contribuye en ese sentido. Cuando una ONPF desarrolla un sistema nacional de vigilancia se deben considerar varios elementos (Figura 3).



Fuente: Secretariat of the International Plant Protection Convention, 2018.

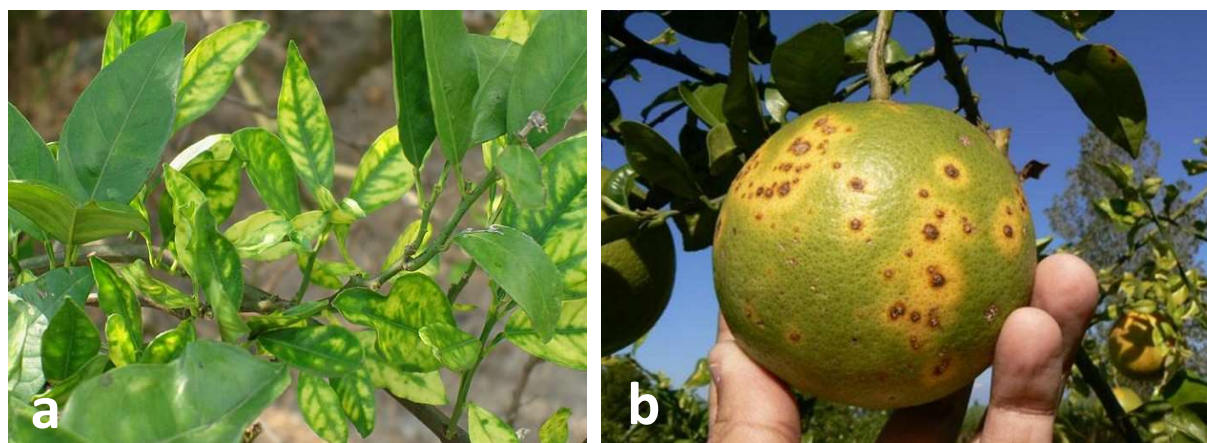
Figura 3. Elementos a considerar cuando una ONPF desarrolla un sistema nacional de vigilancia.

4. Algunos ejemplos de vigilancia fitosanitaria específica

Hay ejemplos de vigilancia fitosanitaria específica especialmente relacionados con plagas o enfermedades invasivas, cuyo objetivo ha sido prevenir la introducción, limitar la extensión cuando éstas ya fueron introducidas y reducir su desarrollo en las zonas invadidas. En todos los casos, diferentes sistemas de monitoreo han sido desarrollados.

4.1. La enfermedad del Huanglongbing (HLB) de los cítricos en México

La enfermedad del HLB (ex greening) de los cítricos se considera una de las enfermedades más devastadoras de los cítricos (11). Esta tiene una amplia distribución geográfica porque es transmitida por dos insectos vectores, dos psílidos: *Diaphorina citri* en Asia y América y *Trioza erytreae* en África. El agente causal es la bacteria *Candidatus Liberibacter* spp. La enfermedad reduce la longevidad de los árboles afectados, la producción y la calidad de los frutos (Figura 4).



Fuente: a) <https://www.phytoma.com/noticias/noticias-de-actualidad/control-de-los-citricos-infectados-con-el-enverdecimiento-huanglongbing-hlb-a-traves-de-calor>, b) <https://infoagro.com.ar/la-enfermedad-huanglongbing-hlb-el-dragon-amarillo/>

Figura 4. a) Hojas de árbol de cítrico con síntomas de HLB; b) Fruto afectado por HLB.



La enfermedad se detectó en México, en julio de 2009, en huertos de Yucatán. Hoy, 24 estados mexicanos tienen la presencia de la enfermedad, alcanzando en octubre del 2018 el 18% del área cultivada en ese país, según el informe presentado por México en la 42 reunión anual de la NAPPO (*North American Plant Protection Organization*).

La vigilancia (26) se basa en tres tipos de monitoreos:

- El monitoreo para la detección del HLB en áreas donde la enfermedad no está identificada.
- El monitoreo para definir la magnitud y la exacta ubicación geográfica de la enfermedad una vez detectada. Con este propósito, los monitoreos se intensifican alrededor del lugar donde fue detectada en círculos concéntricos en incrementos de 8 km.
- El monitoreo de seguimiento: esta actividad evalúa el éxito de las acciones realizadas para el confinamiento, control, erradicación o atenuación de la enfermedad, especialmente a través del manejo del vector.

Para dichos monitoreos se hacen inspecciones de síntomas y también trampeos de los psílidos y diagnóstico molecular para definir si son portadores del patógeno.

4.2. La enfermedad de los olivos causada por *Xylella fastidiosa* en Europa

La bacteria *Xylella fastidiosa* se ha detectado por primera vez en olivos (Figura 5) en Europa en 2013, en la región de Apulia en Italia. *Xylella fastidiosa* tiene un rango de hospederos muy amplio, que incluye muchas plantas cultivadas y silvestres comunes. *Philaneus spumarius* (Hemiptera: Aphrophoridae), un insecto polífago, ha sido identificado como un vector en Apulia (2), pero los vectores potenciales son numerosos. La enfermedad está hoy presente en España y Francia. Los olivos muestran seca de hojas, de ramas e incluso de árboles enteros. El cultivo del olivo se encuentra en una situación de riesgo sin precedente. La enfermedad ha obligado a destruir más de un millón de olivos en los últimos siete años, así como otras plantas potencialmente portadoras de la bacteria.



Fuente: a) SUR, 2018; b) <https://www.elhuertourbano.net/plagas/xylella-fastidiosa/>

Figura 5. A) Planta de olivo afectada por *Xylella fastidiosa* en Italia; b) Frutos de olivares atacados por *Xylella fastidiosa*.

Para lograr contener el avance de la enfermedad, Francia estableció un programa de vigilancia que se extiende a diferentes cultivos, particularmente la vid, en la que la bacteria causa la enfermedad de Pierce (21). Este programa se basa en tres enfoques complementarios:



- Vigilancia oficial programada a través de monitoreos: el número de inspecciones anuales ha sido programado para cada cultivo, basado en un análisis de riesgo y de la topografía. La intensidad del monitoreo decrece con la altura ya que se considera que esas áreas son menos favorables para el establecimiento de la bacteria. El plan pluri-anual especifica qué parcelas se van a monitorear. La mayoría de las parcelas por monitorear se encuentran en las zonas donde ya se detectó la enfermedad con el fin de demarcar las áreas afectadas.
- Vigilancia no oficial programada: la vigilancia de *X. fastidiosa* está incluida en el sistema de monitoreo de las redes de vigilancia epidemiológica existentes cuya misión es detectar plagas reguladas y no reguladas.
- Vigilancia caso por caso: los reportes del público en general son considerados en esta actividad.

La vigilancia se basa en inspecciones de síntomas y también análisis moleculares para confirmar la presencia del patógeno. Se están desarrollando métodos para la detección de la bacteria en los vectores, y de la planta que estos ingirieron, para orientar las actividades de vigilancia según los resultados.

4.3. La roya negra del trigo causada por la raza Ug99 y sus derivados

La roya negra (del tallo) del trigo es causada por *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* (Figura 6). La enfermedad había estado bajo control mediante el uso de resistencias genéticas y la eliminación de su hospedero alterno, el agracejo común, *Berberis vulgaris*. Sin embargo, en 1999, en Uganda, se observó que esta roya había sido capaz de quebrar la resistencia de líneas consideradas resistentes, poniendo en riesgo la producción mundial de trigo (24). Desde entonces, esta nueva raza (Ug99) y sus derivados se han propagado en África y en el Medio Oriente.



Fuente: a) USDA, 2010; b) <https://www.topnews.in/files/strain-Ug99.JPG>

Figura 6. Daño en trigo por ataque de *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*.

En respuesta a la amenaza mundial planteada por Ug99, se formó, a partir del 2005, un sistema global de monitoreo de la roya de los cereales (GCRMS en Inglés) (13). En 2015, 21 000 parcelas a través del mundo habían sido monitoreadas con el fin de detectar posibles anulaciones de la resistencia por Ug99 y otras razas. Las actividades de vigilancia permitieron identificar 7 razas variantes del Ug99, y otras razas más sin relación con ella (29), y establecer su distribución y avance. Al mismo tiempo que las razas virulentas se han estado identificando, se han probado materiales para identificar posibles resistencias y



orientar el mejoramiento genético. Además de las herramientas moleculares desarrolladas para identificar las razas, se tienen modelos que permiten pronosticar posibles trayectorias de dispersión a diferentes escalas (23) y así emitir alertas y orientar las actividades de monitoreo.

5. La vigilancia fitosanitaria para la roya del café

Desde las intensas epidemias de roya del café que iniciaron en 2008 en Colombia, se han puesto en marcha programas de vigilancia fitosanitaria específica en muchos de los países afectados. En estos programas están involucrados las ONPFs y también las organizaciones técnicas dedicadas al café. A continuación, se describen algunos de estos programas.

5.1. La vigilancia en Colombia

Entre los años 2008-2011, la roya presentó una incidencia muy alta debido a las condiciones climáticas de frío, u «ola invernal», que favorecieron la propagación del hongo. Colombia, en esos años vio su producción reducirse de un 31% en promedio con respecto al 2007 (1). La vigilancia inició en 2010, con la roya y la broca, como una ayuda para emitir recomendaciones de manejo oportunas a los productores. En 2015, se incorporaron otras plagas y enfermedades como el ojo de gallo, el minador de la hoja, la arañita roja, y deficiencias nutricionales.

Colombia cuenta con 660 000 fincas y 1 912 000 lotes de café distribuidos en 1001 distritos. En el monitoreo de la Roya del cafeto, la selección de los lotes a evaluar es completamente aleatoria y representativa de toda la zona cafetalera de Colombia. Esto permite hacer inferencia estadística. Se hacen cuatro monitoreos anuales, en los que los lotes seleccionados en cada sondeo son diferentes. Las principales acciones son alertas tempranas (según las dinámicas observadas) y campañas de concientización y capacitación de los productores conducidas por la Federación Nacional de Cafeteros.

5.2. La vigilancia en México

En 2012 se desarrolló un brote epidémico de la roya en Chiapas, cerca de Guatemala, evidenciando la necesidad de desarrollar información en temas de fitosanidad. En ese mismo año, un grupo de expertos (sector oficial, técnicos de campo e investigadores de diversas instituciones mexicanas, personal de Anacafé y la Universidad de San Carlos de Guatemala) identificaron las causas principales de la condición epidémica de la enfermedad en esta zona. Considerando este diagnóstico y las necesidades del sector cafetalero en 2012, el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), a través de la Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV), diseñó e inicia la ejecución de un Programa de Vigilancia Epidemiológica del cafeto (<http://www.royacafe.lanref.org.mx/index.php>) a partir de agosto del 2013.

El sistema de vigilancia se extiende en 199 municipios de 10 estados. El número y distribución de los municipios y parcelas (Cuadro 1) se determina tomando en cuenta la superficie del municipio, la presión de inóculo, y una ventana de inductividad climática para el inicio de la germinación de *Hemileia vastatrix*. Se tienen parcela fijas y dos parcelas móviles (cambiantes) por cada parcela fija a un kilómetro de ésta. Las parcelas fijas llevan equipo meteorológico para construir modelos de pronóstico de la roya basados en el microclima. Las parcelas móviles pueden utilizarse para delimitar focos, zonas donde la severidad de la enfermedad (en planta y en hoja) alcanza niveles suficientes para justificar una acción oficial que ayude a controlar el problema. La frecuencia de monitoreo tanto en parcelas fijas como móviles es semanal (22)



Cuadro 1. Número de parcelas fijas y móviles del programa de vigilancia epidemiológica fitosanitaria (VEF) del café en México

| N° | Estado | Municipios bajo VEF | Parcelas fijas/semana | Parcelas móviles/semana |
|--------------|------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1 | Chiapas | 56 | 80 | 160 |
| 2 | Veracruz | 50 | 65 | 130 |
| 3 | Puebla | 38 | 55 | 110 |
| 4 | Guerrero | 13 | 41 | 82 |
| 5 | Oaxaca | 17 | 70 | 35 |
| 6 | San Luis Potosí | 4 | 20 | 40 |
| 7 | Estado de México | 8 | 5 | 10 |
| 8 | Jalisco | 6 | 10 | 20 |
| 9 | Nayarit | 5 | 15 | 30 |
| 10 | Colima | 2 | 10 | 20 |
| Total | | 199 | 371 | 637 |

VEF: Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria

Fuente: Manual Técnico Operativo 2018 para la VEF en el café, México (5).

5.3. La vigilancia en Costa Rica

En Costa Rica, el ICAFE inició la vigilancia epidemiológica de la roya en 2013. Se monitorean mensualmente 60 parcelas fijas (48 con manejo de la roya, 12 sin fungicida) y 230 parcelas adicionales escogidas aleatoriamente en tres periodos del año (mayo, agosto y noviembre).

Treinta seis parcelas fijas están equipadas con equipo meteorológico que permite la construcción de algoritmos para el pronóstico de la roya. Basándose principalmente en los modelos, se emiten alertas sobre el crecimiento de la roya en las diferentes zonas del país y se hacen recomendaciones de manejo, o se toman acciones para controlar las amenazas más serias. Las alertas se pueden consultar en todo momento en: <http://www.icafe.cr/cicafe/investigaciones/sistema-devaloracion-de-riesgo-de-roya/>.

6. Algunos conceptos útiles para la vigilancia de la roya del café

6.1. ¿Cómo medir la intensidad de una enfermedad?

La intensidad de una enfermedad puede medirse a través de cuatro indicadores principales (19). Puede ser a través de la evaluación de un número de plantas afectadas, o de un número de partes de esas plantas, por ejemplo, de hojas. Se utiliza el término de incidencia para señalar la proporción (o el número) de plantas (o partes de esa planta) afectadas por una enfermedad. La incidencia es una variable clásicamente utilizada en los estudios epidemiológicos y en la vigilancia de la roya del café.

La prevalencia es un indicador que permite medir la intensidad de una enfermedad en una escala más grande. Es el número o la proporción de parcelas afectadas en un área determinada. Es, por lo tanto, una incidencia a escala de la parcela. No es de gran utilidad en plagas y enfermedades ampliamente distribuidas, como en el caso de la roya del café. Sin embargo, puede ser interesante para medir el avance de una plaga o enfermedad invasiva en un territorio. La severidad es una medida de la intensidad de una enfermedad basada en la evaluación del grado de ataque del tejido vegetal. Se puede medir el área de



tejido vegetal afectada, o su porcentaje. Kushalappa y Chaves (14) desarrollaron posiblemente el primer método de evaluación de la severidad de la roya del café (Figura 5).

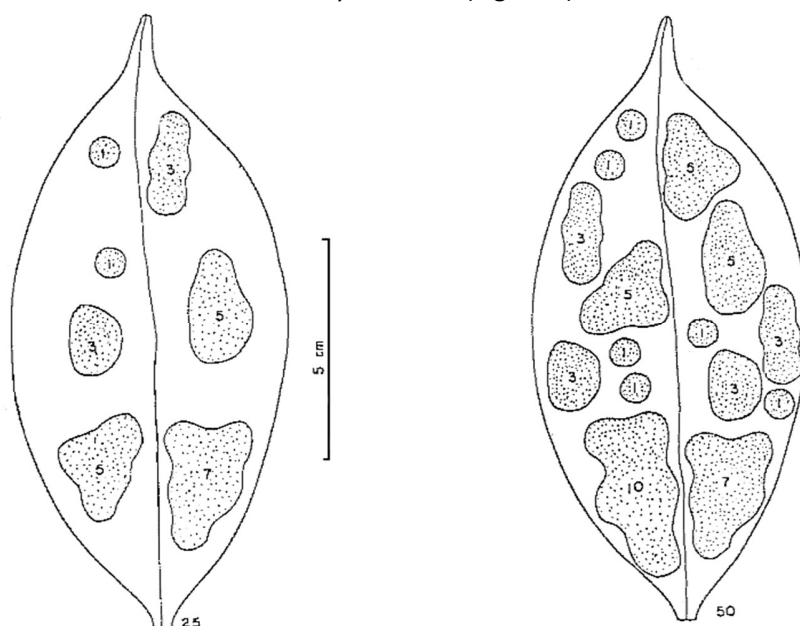


Figura 5. Método de evaluación de la severidad de la roya del café propuesto por Kushalappa y Chaves (1978). A la izquierda 25% de severidad, a la derecha 50 % de severidad en hojas de 50 cm².

Los autores proponen que por debajo de 25% de severidad, se estime directamente el área cubierta por la roya basándose en patrones de área con roya que van de 0.5 cm² (una lesión) a 3.5 cm². Arriba de 25%, los autores consideran posible la estimación porcentual del área afectada. Este método requiere además una estimación del área de las hojas para estimar la proporción de hoja afectada cuando el área afectada es pequeña. Para este propósito se usan patrones de hojas de diferentes tamaños (15). En 2011, Capucho *et al.* (3) desarrollaron y validaron una escala diagramática alternativa, basada en seis niveles de roya (2.5, 5, 10, 20, 40 y 80%) que permiten calibrar el ojo y evaluar la severidad de la roya en porcentaje del área afectada (pueden haber porcentajes intermedios, Figura 6).

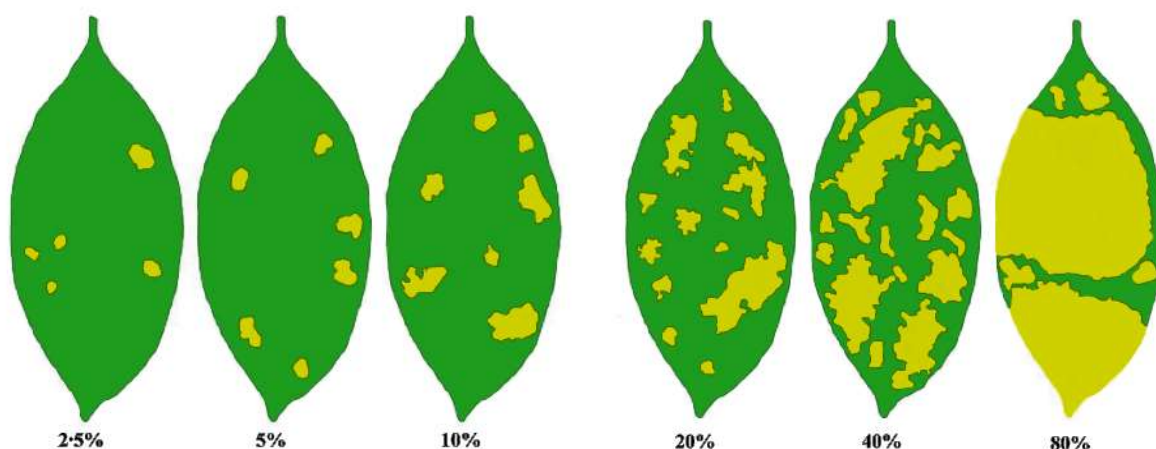


Figura 6. Escala para la evaluación de la severidad de la roya del café propuesta por Capucho *et al.* (2011).

En la práctica, la severidad puede evaluarse utilizando una escala por categorías, asignándole a cada planta, o parte de planta, una categoría según su grado de ataque. Eskes y Toma-Braghini han propuesto escalas para medir severidad en hoja, en rama (Figura 7) y en planta (Figura 8) para sus evaluaciones de la resistencia incompleta del café a la roya (6). Similarmente, a nivel de hoja, SAGARPA Y SENASICA utilizan una escala de severidad en 7 categorías (hoja sana, puntos cloróticos, 2, 7, 20, 45, >70%) en las que los observadores ubican cada hoja enferma. Esta escala se cruza con otra escala diagramática a nivel de planta que cuenta con 5 categorías (planta sana, 3, 10, 30, 60% de área foliar de la planta con presencia de roya) para determinar la intensidad de la enfermedad (5).

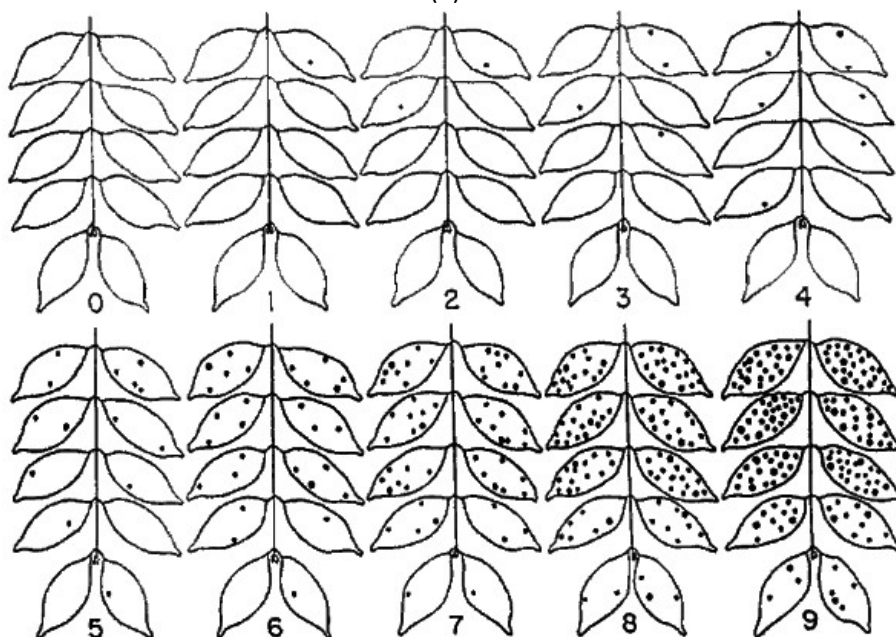


Figura 7. Categorías para la evaluación de la severidad de la roya del café en ramas propuestas por Eskes y Toma-Braghini (1989).

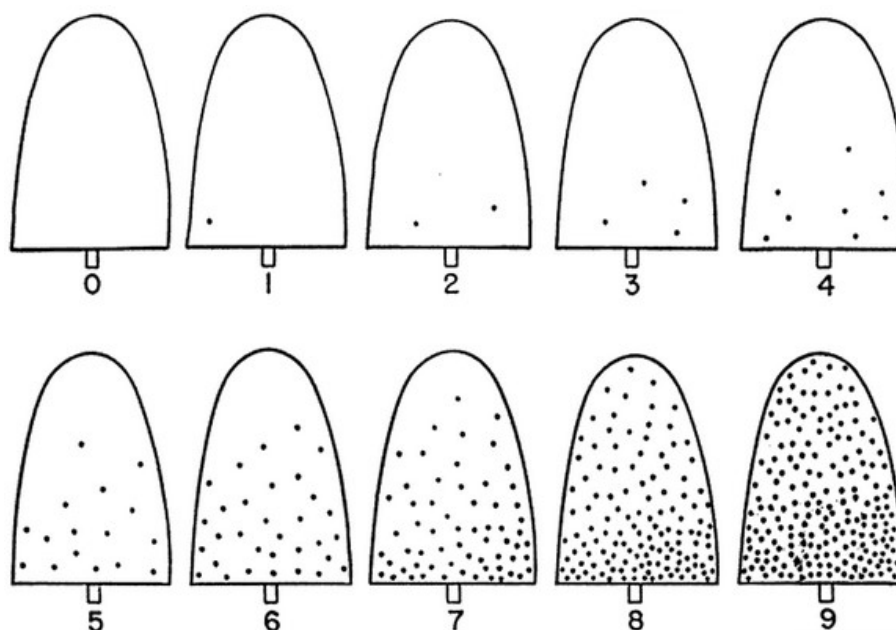


Figura 8. Categorías para la evaluación de la severidad de la roya del café en plantas propuestas por Eskes y Toma-Braghini (1989).

Además de la incidencia, prevalencia y severidad, existe otro indicador de intensidad de una enfermedad. Es el conteo de lesiones. Madden *et al.* (19) recomiendan utilizar el término de conteo para este indicador, y no severidad, porque no todas las lesiones son del mismo tamaño. En el caso de la roya del café, hay pocos estudios epidemiológicos que se han basado en conteos de lesiones, posiblemente porque la lesión no es una unidad muy bien definida - su tamaño puede variar mucho (Figura 9) - y porque en ciertas circunstancias, la cantidad de lesiones puede ser tan alta (cuando son incipientes) que el conteo no es factible. Se puede mencionar sin embargo el trabajo de Silva-Acuña *et al.* (28) en el que los autores contaron lesiones esporuladas.

6.2. ¿Qué medir: severidad o incidencia?

Hay siempre debate sobre si se debe medir o incidencia, o severidad o las dos. En realidad es bien conocido que existen relaciones entre incidencia y severidad que permiten deducir una a partir de la otra (19). Esta relación no es lineal, sino cuadrática. Silva-Acuña *et al.* (28) propusieron dos ecuaciones para deducir el número de lesiones esporuladas por hoja y el porcentaje de área afectada por hoja, a partir de valores de incidencia (Figura 9).

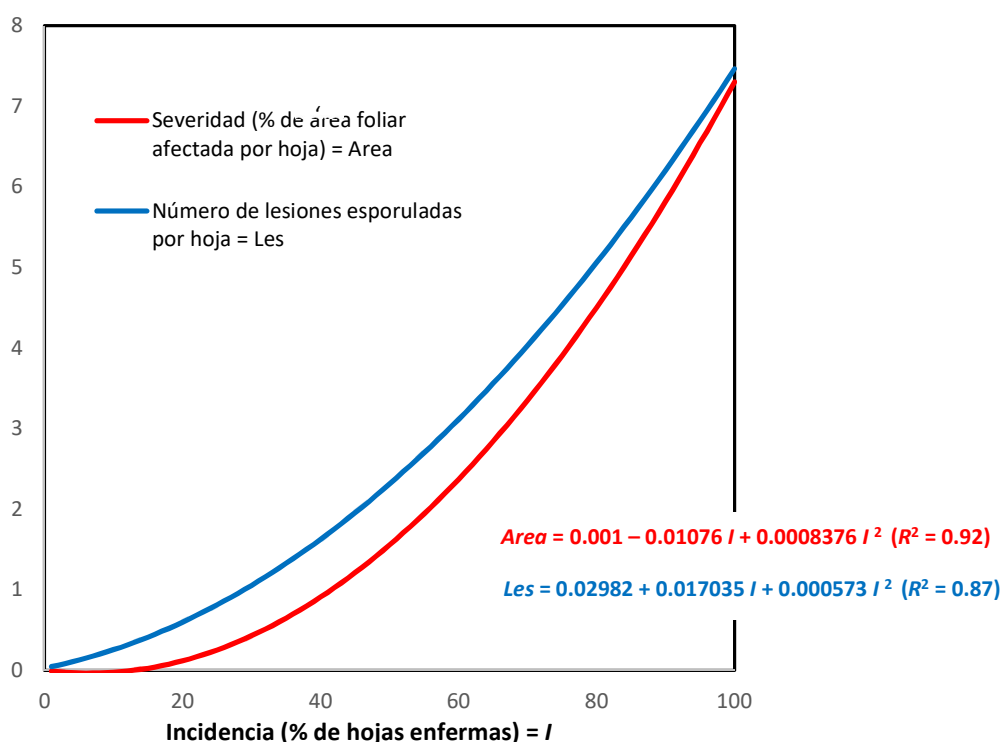


Figura 9. Relaciones entre el número de lesiones esporuladas por hoja por un lado y el área foliar afectada por otro lado con la incidencia de la roya del café de acuerdo a Silva-Acuña *et al.* (1999)

Aunque no se usen esas ecuaciones elaboradas en Brasil hace 20 años, la forma de la relación aporta una gran enseñanza: variaciones de incidencia, cuando ésta tiene valores bajos, hacen variar muy poco la severidad o el conteo; por lo contrario, las mismas variaciones de la incidencia, cuando éstas tienen valores altos, causan grandes variaciones de severidad y de conteo. En otros términos, si fuera necesario medir la

severidad o hacer un conteo, esto sería más útil, cuando las incidencias son altas. Otra utilidad de la severidad es cuando se evalúan pérdidas de producción: las pérdidas están mejor relacionadas con áreas foliares afectadas que con números de hojas afectadas (19).

6.3. ¿Cómo muestrear la intensidad de una enfermedad a escala de una parcela?

En la medida de lo posible, para evitar cualquier sesgo por parte del evaluador, y para que el muestreo represente realmente la población muestreada, se sugiere que éste sea aleatorio (18). Para facilitar la tarea, puede estratificarse el muestreo, es decir se puede dividir la parcela por muestrear en sub-parcelas y aleatorizar el muestreo dentro esas sub-parcelas. Sin embargo, implementar el método aleatorio no es tan sencillo en la práctica. Frecuentemente, se prefiere muestrear a lo largo de un recorrido que el evaluador hace a través de la parcela por muestrear. Ese recorrido puede ser lineal, o en zigzag o en forma de “W” (Figura 11) (10). Aunque cada enfermedad o plaga es un caso especial, una regla general es que es mejor que las plantas muestreadas cubran ampliamente la parcela. Eso es especialmente verdad cuando la distribución espacial de la enfermedad o plaga es agregativa (18). Una buena cobertura aumenta la probabilidad de encontrar los focos.

El muestreo sistemático tiene la ventaja de distribuir homogéneamente las plantas muestreadas en la parcela y así cubrirla adecuadamente. Aunque éste no sea aleatorio, en las evaluaciones de la incidencia, las estimaciones bajo muestreo sistemático tienen los mismos estimadores que en el muestreo aleatorio, pero generalmente presentan menos varianza, por lo que es incluso mejor cuando existen gradientes o focos de incidencia. Además, para realizar un muestreo aleatorio se requiere tener un marco muestral (cada planta en el lote numerada) de manera de poder hacer la asignación aleatoria. El muestreo aleatorio queda entonces sólo para la selección de los lotes a muestrear, pero dentro de cada lote se realiza generalmente un muestreo sistemático.

Para aspectos de vigilancia, puede ser interesante ubicarse en condiciones en que el desarrollo de la enfermedad es favorable, aunque éstas no sean representativas de las condiciones de la parcela, para anticipar el potencial desarrollo de la enfermedad. Es así como en México (5), para el caso de la roya, se propone un método llamado “T” en el que se muestrean 20 plantas, 10 de ellas en el borde de la parcela, y 10 desde el borde hacia el centro de la parcela, formando un “T” (Figura 10). Se sabe que las plantas de borde son más afectadas que las plantas del centro de la parcela en general, porque éstas pueden estar a orilla de camino y ser más expuestas a las llegadas de inóculo ajeno a la parcela. También esas plantas, por estar en el borde tienen mejores producciones (más luz, menos competencia) y son por lo tanto más susceptibles a la roya (18).

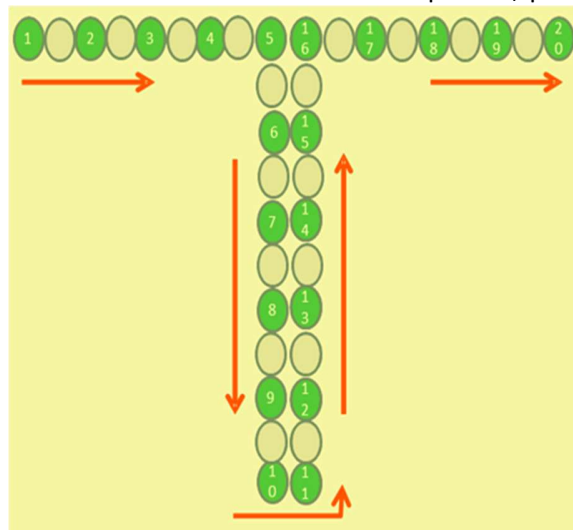
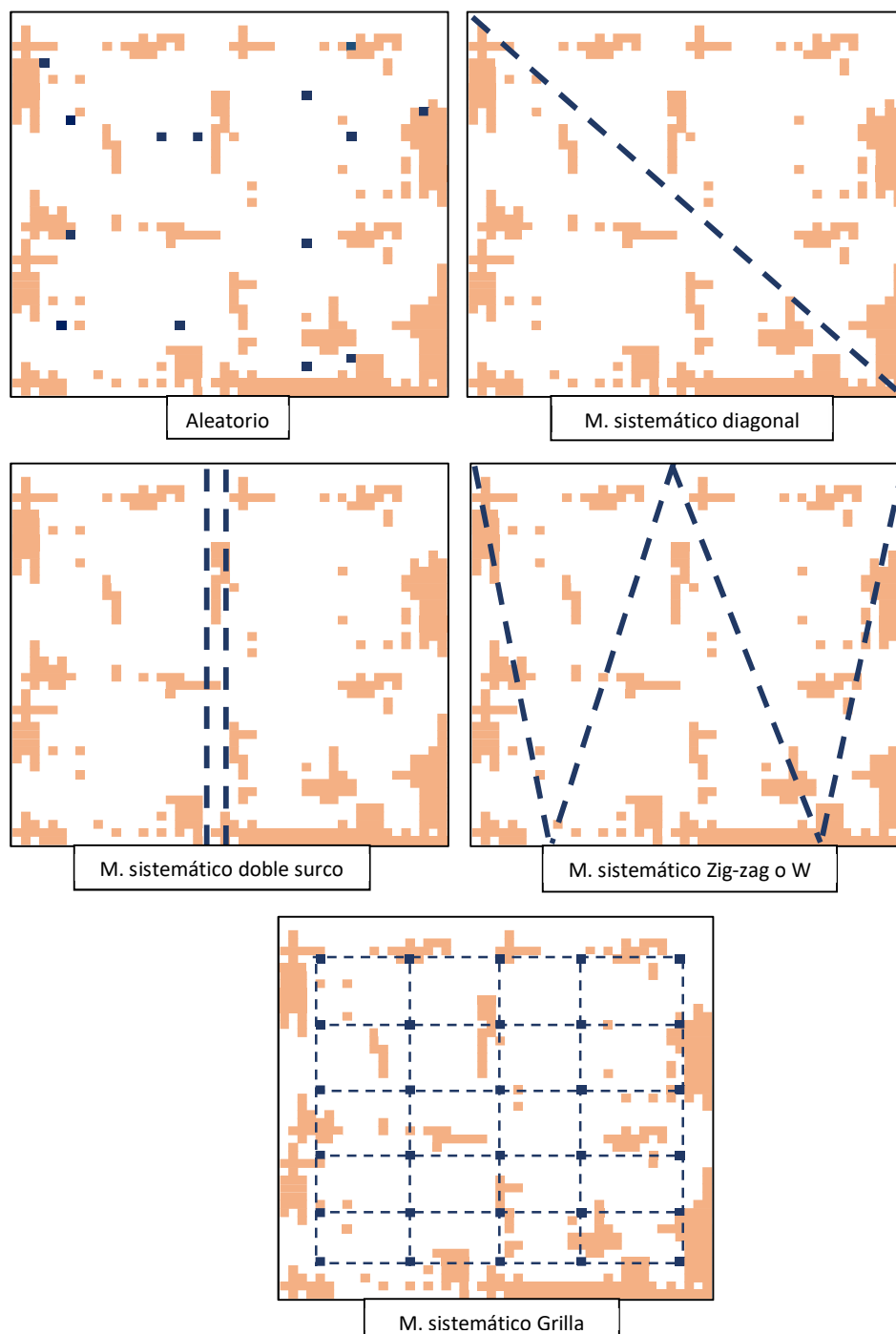


Figura 10. Método de muestreo “T” aplicable en parcelas móviles, para evaluación de severidad de planta (20 plantas) y severidad en hoja (10 hojas por planta) en México. Fuente: Manual Técnico Operativo 2018 para la VEF en el café, México (5).



Fuente: OIRSA, adaptado por Treminio E, 2019.

Figura 11. Tipos de muestreo que se pueden aplicar dentro de la parcela centinela.

6.4. ¿Cuántas plantas, cuantas ramas, cuantas hojas muestrear?

Como regla general, el número de plantas, ramas, hojas por muestrear depende del intervalo de confianza que uno se fija y de la varianza de la variable por estimar en la población. El número de muestras es mayor a mayor varianza y a menor intervalo de confianza (18).



En el caso de la roya del café, se han propuesto diferentes formas de muestrear. Kushalappa y sus colaboradores, en Brasil, han desarrollado todos sus trabajos de epidemiología de la roya en 15 cafetos escogidos aleatoriamente en 1 ha, y 4 ramas marcadas por cafeto (15). En Puerto Rico, Macchiavelli y Rodríguez probaron diferentes modelos de muestreo de la incidencia en posiblemente uno de los mejores trabajos sobre el tema (16). El mejor sistema fue muestrear 20 cafetos (aproximadamente 1 cafeto de cada 60 del lote), en cuatro transectos paralelos, con 5 plantas muestreadas en cada transecto separadas de 5 plantas cada una, evaluando 20 hojas en el tercio medio de cada planta. Este método permite reducir al mínimo la varianza y el error de estimación de la incidencia (no hay sobre-evaluación en particular). Otra enseñanza de este trabajo es que parecía mejor incrementar el número de hojas por planta que el número de plantas. Esto es compatible con los resultados de un trabajo reciente (9), en el que se propuso muestrear 30 cafetos aleatoriamente y dos ramas por cafeto, en lugar de 60 cafetos y una rama por cafeto. Sin embargo, esta regla no parece aplicable para identificar el rompimiento de resistencias. Ya que este evento es inicialmente poco frecuente (pocas plantas afectadas aún en un solo lote), para detectar el rompimiento, es mejor tener más plantas muestreadas, y sólo apuntar la presencia/ausencia de la enfermedad a escala de la planta.

En realidad, es difícil proponer un solo sistema. Son muchos los factores que pueden incidir en la varianza de la incidencia y por lo tanto sobre el tamaño de la muestra y el diseño de muestreo. Lo importante, es definir un sistema que resulte práctico y que cause el menor riesgo de error en las estimaciones de incidencia. De acuerdo a lo indicado anteriormente, se podría proponer muestrear de 15 a 30 plantas y de 2 a 4 ramas por planta para estimar adecuadamente la incidencia en plantas susceptibles.

6.5. Parcelas centinela

Las parcelas centinela son parcelas que se visitan periódicamente para la detección temprana de una plaga o enfermedad y el seguimiento de su propagación a escala de un territorio. Son parcelas fijas que deben ubicarse estratégicamente en el territorio y que avisan, como una centinela, de la llegada del peligro (10). La red de parcelas centinela puede complementarse con parcelas móviles, que van cambiando a través del tiempo, y que por lo tanto se visitan ocasionalmente solamente. El tener una red de parcelas centinela es además interesante para recabar información sobre la enfermedad o la plaga vigilada, y generar conocimiento sobre su biología, ecología y epidemiología. Particularmente los datos pueden ser útiles para construir modelos de pronóstico. Por tal motivo, es recomendable instalar estaciones meteorológicas cerca de esas parcelas.

6.6. El concepto de costo-eficiencia

Una de las reglas en el establecimiento y conducción de un programa de vigilancia es que el programa sea costo eficiente (26). La durabilidad de un programa de vigilancia que no considere este aspecto peligraría grandemente. La eficacia no lo es todo; es importante también considerar el costo y el justo equilibrio entre los dos. Por ejemplo, el programa de vigilancia de la roya de la soya, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, en Estados Unidos, considerado como uno de los más exitosos en el mundo, y que permitió una reducción importante en los costos de producción de los productores, tuvo que trabajar en este aspecto para hacerle frente a las disminuciones de los presupuestos federales y a la pérdida de interés de los estados menos afectados (12, 27). En 2005, el programa contaba con 950 parcelas centinela. Llegó a un pico de 984 parcelas en 2008. Adicionalmente cientos de parcelas móviles eran observadas o monitoreadas. Este nivel de monitoreo se consideró excesivo y no sostenible, y ni siquiera útil. A partir del



2009, aprovechando la cantidad de datos acumulados, se empezó a analizar la forma de desarrollar una estrategia racional para optimizar el número de parcelas centinela, manteniendo la efectividad del monitoreo, una estrategia para mejorar la costo-eficiencia del programa. Una reducción drástica del número de parcelas monitoreadas tuvo lugar a partir de este momento. En 2012, sólo se tenían 285 parcelas centinela monitoreadas (27).

6.7. Monitoreo secuencial

Una forma de ajustar la intensidad del monitoreo es implementando un monitoreo secuencial en el que se toman decisiones sobre intensificar o no el monitoreo de acuerdo a los resultados del monitoreo anterior (detallado en la sección 7.4). Esto ha demostrado ser útil en el monitoreo de plagas y enfermedades (17).

7. Propuestas para la mejora de la vigilancia de la roya en Centroamérica (optimización)

7.1. Algunas consideraciones iniciales

Al igual que lo realizado en el caso de la roya de la soya en Estados Unidos, parece importante proponer un método para mejorar la costo-eficiencia del programa de vigilancia de la roya del café en Centroamérica, basándose en los datos recopilados en la región. A continuación se propone un método (31).

Los planes de monitoreo para plagas o enfermedades cuarentenarias difieren de los planes de monitoreo para el seguimiento epidemiológico de una enfermedad o plaga con relativa homogeneidad de distribución en un territorio. Para asegurar que una plaga o enfermedad poco detectable, o teóricamente ausente (caso de las plagas y enfermedades cuarentenarias), no está presente en un territorio, se requiere de un monitoreo intensivo y sostenido que permita evidenciar la más mínima presencia de esa plaga o enfermedad. La ausencia es siempre difícil de demostrar. Ese no es el caso de la roya del café. La roya del café está presente en América Central desde 1976 y ésta está distribuida en toda la región. Por lo tanto, lo más probable es que los niveles de roya sean >0 , e inclusive relativamente elevados, lo que hace más fácil la detección de la enfermedad. Esto justifica una reducción de la intensidad del monitoreo, al menos en ciertos periodos del año.

El número de parcelas por monitorear en las actividades de vigilancia depende de lo siguiente: (i) El promedio de la incidencia en el territorio por monitorear (ii) El error estándar asociado al promedio de la incidencia (iii) Un factor de agregación de la incidencia.

- El promedio de la incidencia incide en la intensidad del monitoreo de dos formas:

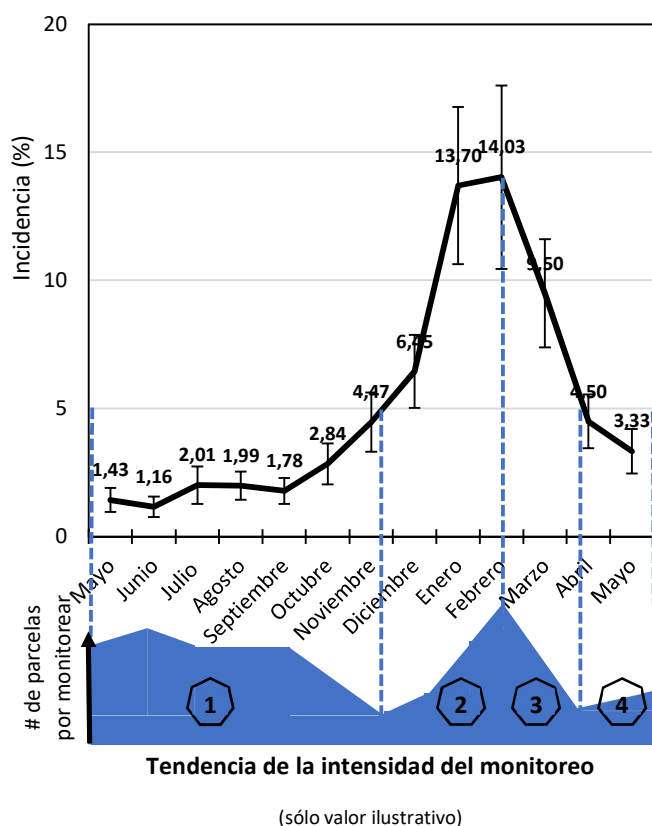
Si el promedio de la incidencia es muy bajo (debajo de cierto umbral, que podría llamarse umbral de detectabilidad), estamos casi en lo descrito inicialmente. Puede ser complicado detectar la enfermedad y, por lo tanto, para hacer una buena estimación de la incidencia de roya, la cantidad de parcelas que hay que monitorear debe ser mayor: abajo del umbral de detectabilidad, la cantidad de parcelas aumenta a medida que uno se acerca a 0%.

Si el promedio de la incidencia es suficiente (arriba del umbral de detectabilidad), entonces no se tienen problemas de detectabilidad. Lo que debe considerarse, en este punto, es que la varianza (V) de la incidencia (I), expresada como proporción, tiene este comportamiento $V = I(1 - I)/n$ (17), donde n es el número de parcelas monitoreadas. Esto significa que la varianza es mínima cuando la incidencia es nula (si $I=0$, entonces $V=0$) o cuando la incidencia es máxima (si $I=1$, entonces $V=0$ también). La varianza máxima se encuentra cuando $I=0.5$ (50%).

Por lo tanto, arriba del umbral de detectabilidad, para tener una buena estimación del promedio de la incidencia, es necesario incrementar el número de parcelas por monitorear (n) para reducir la variabilidad, que tiende a aumentar a medida que uno se acerca a 50% de incidencia. Ahora bien, si el promedio de la incidencia es muy alto (arriba del 50%), la variabilidad empieza a disminuir de nuevo, por lo cual se puede reducir la intensidad del monitoreo.

- El error estándar es una forma de medir la variabilidad de los datos. Es la relación entre la desviación estándar (la raíz cuadrada de la varianza) y la raíz cuadrada del tamaño de la muestra o número de parcelas monitoreadas. Como fue explicado anteriormente, cuanto más grande sea la variabilidad, más grande tiene que ser el número de parcelas para poder estimar el promedio de la incidencia con una precisión determinada.

En la Figura 12, realizada con los datos de Honduras, se resume lo indicado arriba.



Si se considera que el umbral de detectabilidad es 5%, la intensidad del monitoreo será mínima en 5% (la variabilidad es baja y la detectabilidad adecuada).

- 1 Se incrementa la intensidad del monitoreo para valores del promedio de la incidencia cerca del 0% por problemas de detectabilidad de la enfermedad.
- 2 Se incrementa la intensidad del monitoreo arriba del 5% de incidencia en promedio hasta el pico de la incidencia porque la variabilidad aumenta (ver que los valores del error estándar aumentan).
- 3 La intensidad del monitoreo baja después del pico de la incidencia hasta el umbral de 5% porque la variabilidad disminuye.
- 4 La intensidad del monitoreo sube de nuevo debajo del umbral de 5% a medida que uno se acerca al 0%, por los problemas de detectabilidad ya mencionados.

Figura 12. Curva de progreso de la roya del café, variedad Lempira, altura < 700 msnm, Honduras (Mayo 2017-Mayo 2018) y tendencia del número de parcelas por monitorear en relación con la incidencia observada.



- La agregación de los valores de la incidencia también incide en la cantidad de parcelas por monitorear (17). Si, por ejemplo, las incidencias están agregadas, es que existen posiblemente focos. Para que el monitoreo logre una buena estimación de la incidencia, el monitoreo tiene que alcanzar los focos. Eso es más probable con un mayor número de parcelas monitoreadas: a mayor agregación de los valores de la incidencia mayor número de parcelas por monitorear.

7.2. Cálculo del número de parcelas por monitorear

- Para determinar el número de parcelas por monitorear, se necesita por lo tanto (17):
 - Tener una estimación de la incidencia esperada en cada mes del monitoreo: esto se obtiene a partir del conocimiento del desarrollo de la enfermedad; se sugiere utilizar las incidencias obtenidas en las actividades de monitoreo del año anterior, pero se puede ajustar (ver sección 7.4.).
 - Tener una estimación del error estándar (*ee*) asociado al promedio de la incidencia: este valor es fácil de calcular cuando se tienen datos de incidencia. Igualmente, se puede utilizar el *ee* obtenido en las actividades de monitoreo del año anterior, pero se puede ajustar (ver sección 7.4.).
 - Tener una estimación del factor de agregación (llamado ρ = rho). Este es más complicado de calcular. Sin embargo, el factor de agregación está relacionado con la incidencia. Si el promedio de la incidencia es muy bajo, es muy probable que no haya agregación porque todas las parcelas están casi sanas. Ahora bien, si el promedio de la incidencia es muy alto, es muy probable que tampoco haya agregación porque todas las parcelas están muy infectadas. La Figura 13 ilustra la relación encontrada en la región entre las incidencias de roya del café y el factor de agregación ρ . Esta puede utilizarse para deducir valores plausibles de ρ conociendo la incidencia esperada, cuando no se tiene ninguna idea del valor de ρ (ver sección 7.4.). Un valor de 30% (o 0.3 en proporción) de incidencia da un valor de ρ de 0.172.

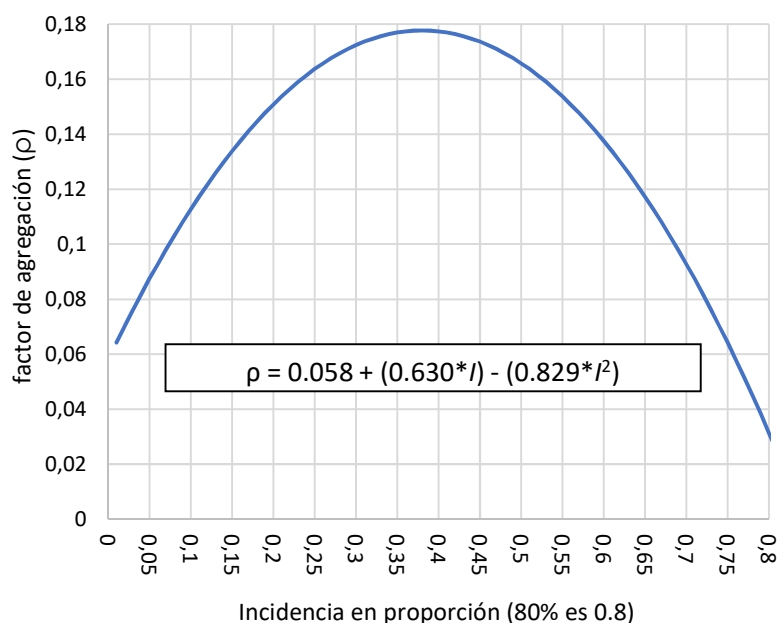


Figura 13. Relación entre la incidencia de la roya del café y el factor de agregación ρ ; la relación se obtuvo con los datos de vigilancia de la roya de Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana tomados en el periodo 2015-2018.



- El cálculo del número de parcelas necesario se hace utilizando las fórmulas indicadas en el Cuadro 2 (17):

Cuadro 2. Método de evaluación del número de parcelas por monitorear de acuerdo al valor esperado de la incidencia y la agregación

| Incidencia esperada en el mes de monitoreo (I_e) | Factor de agregación (ρ) | Número de parcelas por monitorear (N) |
|---|--|---|
| $I_e < 0.05$ (5%) La enfermedad es difícil de detectar | $\rho < 0.1$ no hay agregación | $N = \frac{\log(P)}{n * \log(1 - I_e)}$ |
| $I_e \geq 0.05$ (5%) La enfermedad es fácil de detectar | $\rho < 0.1$ no hay agregación | $N = \frac{I_e * [1 - I_e]}{n * ee^2}$ |
| $I_e < 0.05$ (5%) La enfermedad es difícil de detectar | $\rho \geq 0.1$ hay agregación | $N = \frac{-\rho \log(P)}{I_e * \log(1 + n\rho)}$ |
| $I_e \geq 0.05$ (5%) La enfermedad es fácil de detectar | $\rho \geq 0.1$ hay agregación | $N = \frac{I_e * [1 - I_e][1 + \rho(n - 1)]}{n * ee^2}$ |

I_e puede deducirse de las incidencias observadas en el año anterior en el mismo mes

ee es el error estándar asociado al promedio de la incidencia y puede deducirse de los valores de ee observados en el año anterior en el mismo mes

ρ puede deducirse de la figura del punto 2 conociendo I_e

n es el número de plantas monitoreadas en la parcela, normalmente 30 de acuerdo a las recomendaciones de OIRSA (9)

P es el nivel de significancia; se recomienda $P=0.01$

Si se tiene un promedio de incidencia esperado de $I_e=30\%$ ($0.3 > 0.05$), se tendría un valor plausible de $\rho=0.172$ (>0.1) de acuerdo al cálculo detallado en la Figura 14. Los valores de I_e y de ρ llevan a utilizar la última fórmula del Cuadro 2. Suponiendo que el ee asociado a este promedio de incidencia es 0.046 (valor plausible), se deduce que el número de parcelas por monitorear es:

$$N = \frac{0.3[1 - 0.3][1 + 0.172(30 - 1)]}{30 * 0.046^2}$$

$$N = 20$$

Figura 14. Cálculo del número de parcelas por monitorear con un promedio de incidencia del 30%.

7.3. Reducir el número de parcelas por monitorear categorizando las parcelas

Como ya se ha indicado, el número de parcelas por monitorear depende del error estándar (ee) asociado al promedio de la incidencia. Si ese error es alto, el número de parcelas aumenta. Una forma de reducir el número de parcelas es por lo tanto reduciendo el error estándar. Para eso, se puede agrupar las parcelas de acuerdo a características que determinan las incidencias de roya. Parcelas que tengan esas características en común se parecerán en cuanto a sus incidencias de roya. De acuerdo a los datos de



vigilancia de Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana, las variables que mejor explican la roya son la altura sobre el nivel del mar y el tipo de variedad.

Los rangos altitudinales (en metros) que discriminan mejor las incidencias son: 0-700, 700-1100, 1100-1500, >1500. Los tipos de variedades son: susceptibles (ejemplo=Caturra, Catuaí, etc.), medianamente resistente (ejemplo=Lempira en Honduras), resistente (ejemplo=IHCAFE 90). El número de parcelas por monitorear (ver punto anterior) debe calcularse para cada una de las categorías de parcelas: 4 alturas \times 3 tipos de variedad; son 12 categorías de parcelas.

7.4. Ajustando el número de parcelas por monitorear

El número de parcelas por monitorear puede ajustarse para (i) tener un número mínimo aceptable de parcelas, (ii) para evitar un número demasiado alto de acuerdo a la existencia real de parcelas de la categoría que se está monitoreando en el territorio, (iii) para evitar un número demasiado bajo de acuerdo a las incidencias realmente observadas.

- Se recomienda agregar siempre un número de 10 parcelas al número de parcelas que se van a monitorear para asegurar una cantidad mínima de parcelas.
- El número de parcelas por monitorear puede resultar muy alto en relación con las parcelas disponibles que presentan las características de variedad y altura deseadas: por ejemplo, puede que haya muy pocas parcelas a nivel nacional con variedades susceptibles debajo de 700 m de altura. Para tomar en cuenta eso, se propone ajustar el número de parcelas por monitorear al número de parcelas existentes, utilizando la fórmula:

$$N_{aj} = \frac{(N + 10) * N_p}{N_p - 1 + N + 10}$$

donde, N_{aj} es el número de parcelas por monitorear en cada una de las categorías descritas en la sección 7.3. y, ajustándolo tras considerar la cantidad de parcelas que existen en esas categorías, N_p . N es el número de parcelas por monitorear según las fórmulas del Cuadro 2 al que se le agregó 10 parcelas como indicado arriba, para asegurar un mínimo de parcelas. Si, por ejemplo, lo que se pretende monitorear son parcelas con variedades susceptibles debajo de 700 m de altura, que se estima que sólo son 200 las parcelas en el país con estas condiciones, y que el N que se obtuvo es 20, entonces el número de parcelas por monitorear ajustado sería:

$$N_{aj} = \frac{(20 + 10) * 200}{200 - 1 + 20 + 10} = 26$$

De 30 parcelas propuestas inicialmente (20+10), se pasa a 26 para tomar en cuenta la existencia de ese tipo de parcelas en el país. La Figura 15 representa los valores ajustados del número de parcelas que habría que monitorear (en ordenadas), de acuerdo (i) al número de parcelas por monitorear N , obtenido según las fórmulas del Cuadro 2 y agregándole 10 ($N+10$), en abscisas (ii) a la existencia de parcelas en la categoría que se pretende monitorear (las diferentes curvas). Se puede observar que, con 5000 parcelas en existencia en el territorio, ya no se propone casi ninguna reducción del número de parcelas por monitorear.

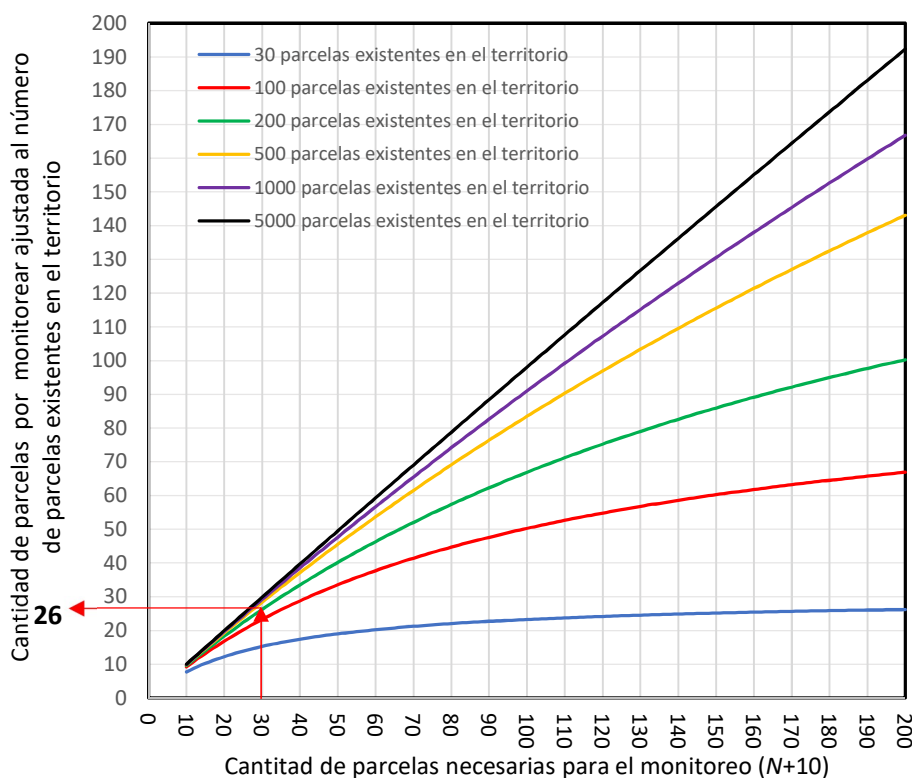


Figura 15. Ajuste del número de parcelas por monitorear considerando la existencia de parcelas en el territorio bajo vigilancia

- El número de parcelas por monitorear depende de la incidencia esperada I_e (ver sección 7.2.). ¿Qué pasaría si la incidencia observada (I_o) después del monitoreo es mayor a la que se consideró para el cálculo del número de parcelas por monitorear: $I_o > I_e$?

Eso significaría que el número de parcelas por monitorear que se calculó estuvo sub-evaluado. Habría que recalcular N con I_o , en lugar de I_e , utilizando el error estándar (ee) y el factor de agregación encontrados (ρ) después del monitoreo, aunque también se puede utilizar la Figura 15 para este paso. Por ejemplo, si se esperaba una incidencia de 30%, $I_e = 0.3$, con un ee de 0.046 y un ρ de 0.172, el N sugerido (antes de agregar 10) es 20 (ver sección 7.2.). Si después del monitoreo, la incidencia observada es del 40%, $I_o = 0.4$, considerando que ee y ρ no cambiaron (aunque se pueden recalcular), se obtendría, utilizando la última fórmula del Cuadro 2:

$$N = \frac{0.4[1-0.4][1+0.172(30-1)]}{30 \cdot 0.046^2} = 23$$

Habría que ir a monitorear 3 fincas más (23-20), al día siguiente, para completar la muestra.

Si después del aumento del número de parcelas, el nuevo I_o se encuentra arriba del nuevo I_e , que es la incidencia utilizada (0.4 en el ejemplo) para el nuevo cálculo de N , eso significaría que el monitoreo sigue sub-dimensionado y que más muestras son necesarias. Ese nuevo incremento se calcularía de la misma

forma. El monitoreo se detiene si $I_o < I_e$. En otros términos, se propone un tipo de monitoreo secuencial en el que se decide de continuar o parar el monitoreo mensual de acuerdo a los resultados de un monitoreo previo realizado en el mismo mes (ver sección 6.7.). Se ilustra lo explicado en la Figura 16.

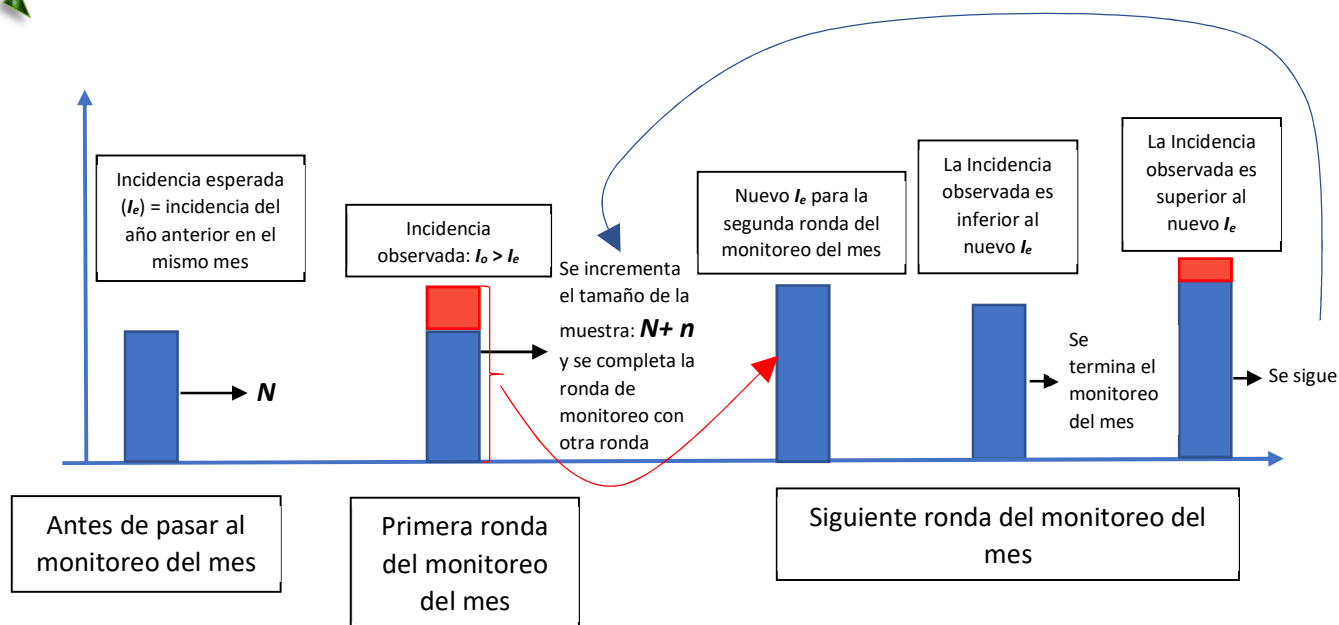


Figura 16. Proceso de monitoreo secuencial para la vigilancia mensual de la roya del café

- Si, en un monitoreo determinado, se observa que las incidencias aumentaron con respecto a lo esperado (basado en las incidencias del año anterior), se puede anticipar un aumento en las incidencias del siguiente monitoreo. Para el cálculo del número de parcelas por monitorear en el siguiente monitoreo, se puede considerar un aumento en la incidencia esperada del mismo tamaño que el que se observó en el monitoreo anterior, así como se explica en la Figura 17.

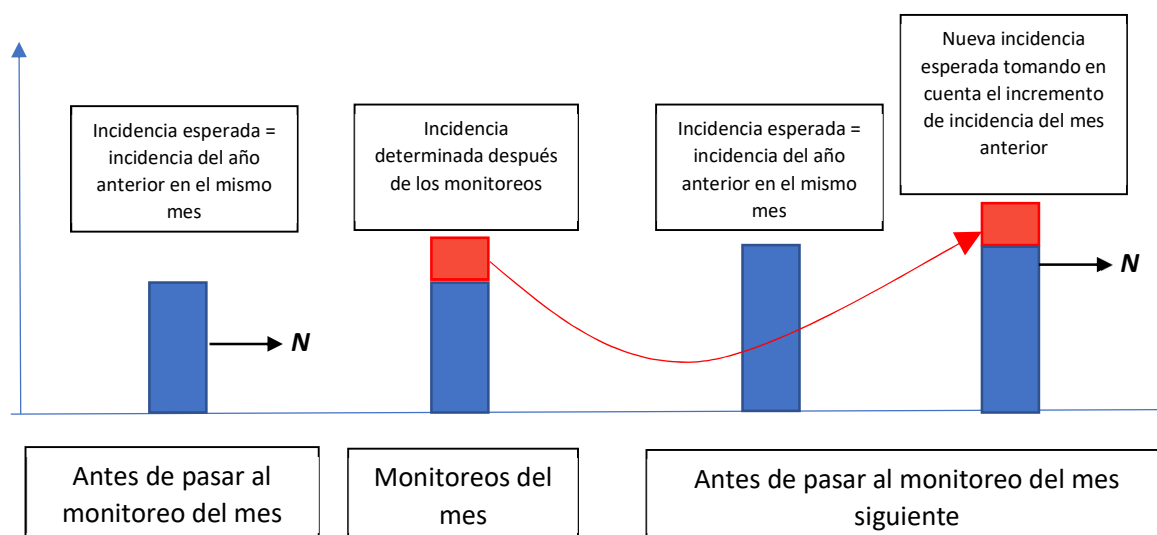


Figura 17. Ajuste del número de parcelas por monitorear en un mes considerando el resultado del monitoreo del mes anterior.



7.5. Distribución de las parcelas a nivel territorial

De lo propuesto en la sección 7.3., se deduce que el muestro debe ser estratificado (las diferentes categorías de parcelas). Se propone adicionalmente que éste sea sistemático, es decir que respete una distribución regular de las parcelas por monitorear según una grilla con puntos equidistantes en cada zona de producción.

Finalmente, se recomienda que el número de parcelas por monitorear en una categoría determinada en cada zona de producción sea proporcional al número de parcelas existentes de esa categoría en cada zona. Por ejemplo, si el número de parcelas por monitorear a nivel nacional es de 30 en una categoría de fincas determinada (podría ser la categoría debajo de 700 m de altura × variedad susceptible), y que el número de parcelas estimado en esa categoría en el país es de 3000, distribuidas en tres zonas de producción, con 500 en una (Z1), 1000 en otra (Z2), y 1500 (Z3) en la última, las parcelas por monitorear deberían distribuirse así:

$$\begin{aligned}N_{Z1} &= 500 * 30 / 3000 = 5 \\N_{Z2} &= 1000 * 30 / 3000 = 10 \\N_{Z3} &= 2000 * 30 / 3000 = 15\end{aligned}$$

7.6. Retomando los pasos del plan de optimización del monitoreo de la roya del café para actividades de vigilancia

En el Cuadro 3, se resumen los pasos para la optimización del monitoreo de la roya del café detallados anteriormente.

Cuadro 3. Método de evaluación del número de parcelas por monitorear de acuerdo al valor esperado de la incidencia y la agregación.

| | Pasos | Donde encontrar la información | Comentario adicional |
|---|---|--------------------------------|---|
| 1 | Se categorizan las parcelas monitoreadas en el año anterior de acuerdo a altura y susceptibilidad de la variedad | 7.3. | |
| 2 | Se calculan los promedios de incidencia, error estándar (ee), y factor de agregación por categoría y por mes. Los promedios de incidencia del año anterior pueden fungir como incidencias esperadas para el año en curso. Igual, los ee asociados a estas incidencias pueden considerarse como los ee a utilizar. | 7.1. y 7.2. | El factor de agregación puede deducirse de la Figura 20. La incidencia esperada puede ajustarse fácilmente a medida que se hace el monitoreo (ver sección 7.4.). |
| 3 | Conociendo el promedio de la incidencia de cada mes, el error estándar asociado al promedio de la incidencia, y el factor de agregación se deduce el número de parcelas por monitorear | Cuadro 2 | |
| 4 | A ese número se le agregan 10 fincas, para evitar muestras demasiado pequeñas | 7.4. | |
| 5 | Se ajusta el número de parcelas por categoría según la existencia de ese tipo de parcelas en el país | 7.4. | La estimación del número de parcelas existentes en cada categoría puede deducirse del área total cultivada, del promedio del área de las fincas, de la distribución de las fincas en diferentes rangos altitudinales, y de la distribución de las variedades. |

| | Pasos | Donde encontrar la información | Comentario adicional |
|---|--|--------------------------------|--|
| 6 | Se distribuyen las parcelas proporcionalmente en las zonas de producción en forma sistemática | 7.5. | Algunas de esas parcelas pueden ser fijas, pero la mayoría de ellas son móviles. Las parcelas fijas son útiles para profundizar el conocimiento sobre la biología, ecología, epidemiología de la plaga o enfermedad monitoreada (ver sección 6.5.) |
| 7 | Se monitorean las parcelas y se calcula la incidencia observada; si la incidencia observada es inferior a la incidencia esperada, el monitoreo continúa, sino éste se detiene. | 7.4. | En cada ronda del monitoreo del mes pueden actualizarse los valores del error estándar y del factor de agregación |
| 8 | Si la incidencia observada del monitoreo es superior a la incidencia esperada, la diferencia puede utilizarse para calcular una nueva incidencia esperada para el siguiente monitoreo. | 7.4. | |

8. La vigilancia en apoyo a las alertas

Los resultados de la vigilancia, además de generar conocimiento sobre la plaga o enfermedad monitoreada, y de avisar del riesgo de la plaga o enfermedad vigilada, deben también servir para tomar acciones. Es por lo tanto importante definir los niveles de incidencia y las acciones específicas que se tomarán cuando estos niveles se alcancen.

8.1. Nivel de daño económico y umbral económico

Las acciones que se toman son, en principio, para evitar alcanzar el nivel de daño económico, es decir la cantidad de enfermedad o la densidad de población de una plaga que causa un daño económico. El daño económico es la cantidad de daño que justifica el costo de las medidas de control (30). Además de depender de la plaga o enfermedad, el nivel de daño económico depende también del valor del producto agrícola producido y del costo del control. Sin embargo, el nivel de daño económico no es un umbral de acción para combatir la enfermedad o la plaga. El umbral de acción es un umbral inferior, llamado umbral económico. El umbral económico es la cantidad de enfermedad o la densidad de población de una plaga en la que deben implementarse las medidas de control para evitar que la plaga o enfermedad siga creciendo y alcance el nivel de daño económico, considerando el tiempo necesario para que las medidas se implementen y surtan efecto (30).

El considerar el tiempo indica que los umbrales podrían variar en función de las condiciones que determinan el desarrollo de las epidemias. En condiciones en que el desarrollo de las epidemias es más lento, hay más tiempo para actuar, y por lo tanto los umbrales pueden ser más altos. En el caso de la roya, las variedades con resistencia incompleta, como la variedad Lempira, en las que la enfermedad se desarrolla más lentamente, podrían tener umbrales económicos más altos que las variedades susceptibles tradicionales en las que el desarrollo de la roya es más rápido. Similarmente, en altitudes muy altas en donde el desarrollo de la roya es más lento, podría haber umbrales más altos que en altitudes más bajas en las que el desarrollo de la enfermedad es más rápido. Aunque el nivel de daño económico no sea un umbral de acción para combatir la enfermedad o la plaga, es un nivel en que la economía de las familias productoras estará impactada. Por lo tanto, puede ser considerado como un umbral de acción para tomar medidas socio-económicas en apoyo a los productores.

8.2. Pérdidas de producción en cultivos perennes

En cultivos perennes como el café, las pérdidas de producción son de dos tipos. Están las pérdidas primarias que son las pérdidas de producción causadas en la producción del año en que ocurre la epidemia, y las pérdidas secundarias que son las pérdidas de producción que esta misma epidemia causa en las producciones siguientes (4). Las pérdidas primarias están determinadas por los niveles de roya alcanzados hasta el final de la cosecha. Las pérdidas secundarias están determinadas por los niveles de roya alcanzados hasta después de la cosecha (ver Figura 18). En el caso de la roya del café, las pérdidas secundarias están muy relacionadas con la cantidad de ramas muertas que la epidemia causó (4). Toda acción que permita reducir la cantidad de ramas muertas, aún iniciada la cosecha, permitirá reducir las pérdidas de producción secundarias.

Para encontrar los niveles de daño económico en cultivos perennes, deben considerarse los efectos inmediatos en la producción del año en que ocurre la epidemia, los efectos atrasados en las producciones de las cosechas siguientes y el tiempo de recuperación de la planta para llegar a sus niveles de producción que tenía antes de la epidemia. La aplicación de los conceptos de nivel de daño económico y de umbral económico es más complicada en los cultivos perennes que en los cultivos anuales por la existencia de pérdidas primarias y secundarias (32), y también por el hecho que hay diferentes momentos a lo largo del periodo de recuperación de la planta en los que se puede actuar y diferentes formas de actuar para evitar o reducir las pérdidas.

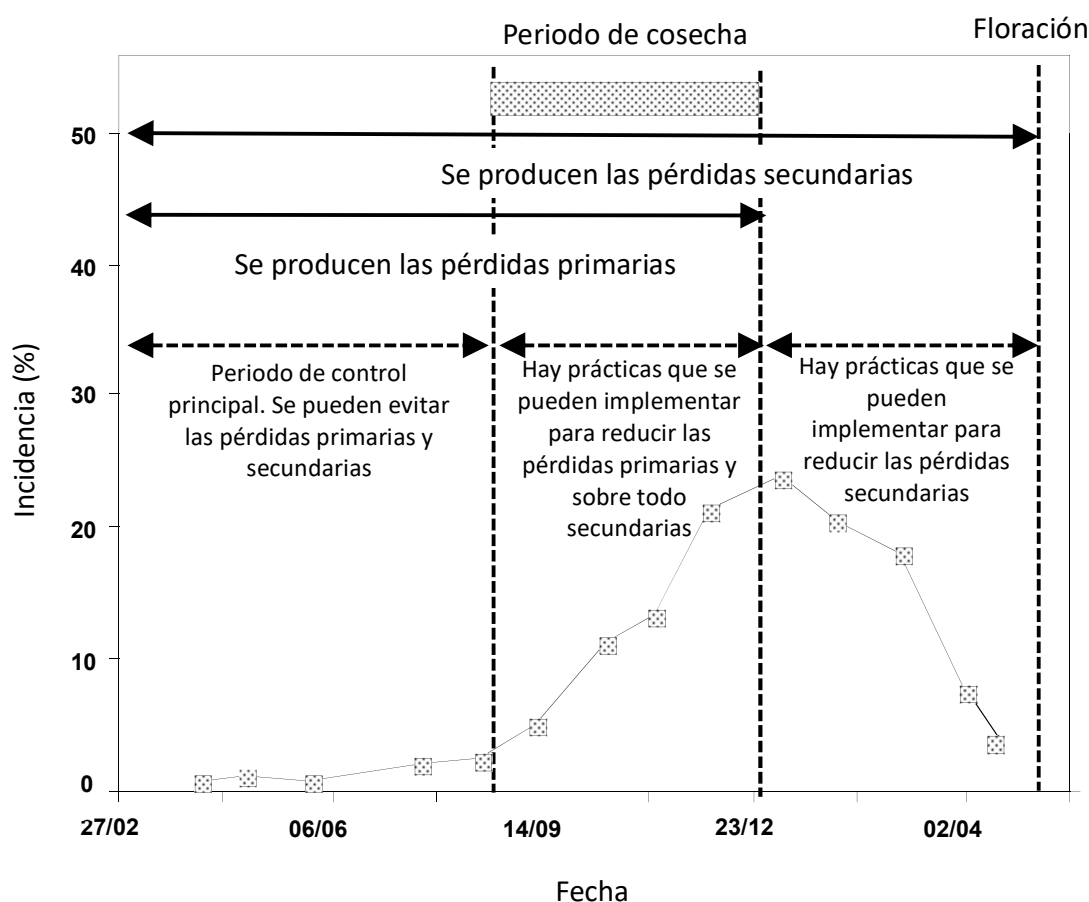


Figura 18. Pérdidas de producción y posibilidades de reducirlas en el año en que ocurre la epidemia.

8.3. Umbrales de alerta en el caso de la roya del café

OIRSA ha propuesto organizar las alertas para la roya del café en cinco niveles: alerta azul (riesgo mínimo), alerta verde (riesgo bajo), alerta amarilla (riesgo moderado), alerta naranja (riesgo alto), alerta roja (riesgo máximo) (8). Para definir los umbrales que determinan esas alertas, se sugiere basarse en tres ideas centrales:

La principal es que se consideren los umbrales de alerta como umbrales de acción que se definen de acuerdo a la acción y el periodo en el que ésta se pretende implementar. Antes de cosecha, los umbrales son bajos, porque las acciones están enfocadas principalmente al control químico de la roya, el cual para ser eficiente debe implementarse con niveles bajos de roya. Durante la cosecha, las acciones están enfocadas principalmente al control cultural de la enfermedad, a prácticas de manejo que pueden reducir las pérdidas secundarias. Los umbrales pueden ser más altos. También se pueden tomar medidas de tipo socio-económico para hacerle frente a las pérdidas de producción y de empleo que no se podrán evitar. Después de cosecha, las acciones están enfocadas a medidas económicas y a prácticas para la recuperación de la capacidad productiva. Igualmente, los umbrales pueden ser más altos que los que se consideran antes de cosecha. El segundo punto es que las alertas deben ser razonables; los usuarios no le prestarían atención a un sistema que estaría en alerta naranja o roja permanente. Hay niveles que pueden considerarse como graves en ciertas épocas del año, pero aceptables en otras. Así, un 10% de incidencia puede considerarse como grave a inicios de la época de lluvias, pero insignificante después de cosecha. El tercer punto es que los umbrales pueden variar de acuerdo a factores que influyen en la velocidad de desarrollo de la epidemia, la cual influye a su vez sobre el tiempo disponible para actuar (ver sección 8.1.).

Por lo anterior, los niveles de roya que determinan las alertas podrían variar a través del año, basándose en la fenología de la planta como criterio para los cambios (Figura 19). También podrían variar de acuerdo al nivel de resistencia o susceptibilidad que presenta la variedad (ver sección 8.1.). Sin embargo, como los umbrales de alerta son umbrales de acción, las acciones por tomar, tanto recomendaciones de manejo/control de la enfermedad como acciones institucionales de tipo fitosanitario y socio-económico, dependerán del color de alerta y de la época del año únicamente.

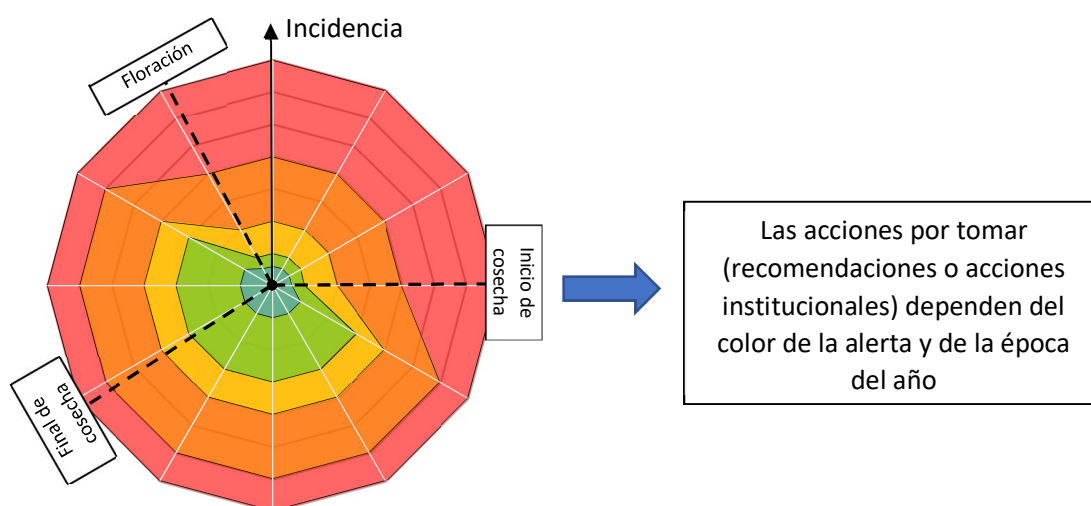


Figura 19. Definición de los umbrales de alerta de acuerdo a la fenología del cafeto: los umbrales de alerta son umbrales de acción



9. Referencias

1. Avelino J, Cristancho M, Georgiou S, Imbach P, Aguilar L, et al. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): impacts, plausible causes and proposed solutions. *Food Security* 7: 303-21
2. Baker R, Bragard C, Caffier D, Candresse T, Gilioli G, et al. 2015. Scientific Opinion on the risk to plant health posed by *Xylella fastidiosa* in the EU territory, with the identification and evaluation of risk reduction options. In *Efsa Journal*, pp. 262
3. Capucho AS, Zambolim L, Duarte HSS, Vaz GRO. 2011. Development and validation of a standard area diagram set to estimate severity of leaf rust in *Coffea arabica* and *C. canephora*. *Plant Pathology* 60: 1144-50
4. Cerda R, Avelino J, Gary C, Tixier P, Lechevallier E, Allinne C. 2017. Primary and secondary yield losses caused by pests and diseases: Assessment and modeling in coffee. *PLoS ONE* 12: e0169133
5. Dirección General de Sanidad Vegetal CNRF-VEFCC. 2018. *Manual Técnico Operativo 2018, para la Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en el Cultivo del Cafeto*: SAGARPA SENASICA. 31 pp.
6. Eskes AB, Toma-Braghini M. 1989. *Métodos de evaluación de la resistencia a la roya del cafeto (Hemileia vastatrix Berk & Br.)*: IICA, PROMECAFE. 26 pp.
7. FEWSNET, RUTA, PROMECAFE. 2014. *Coffee producer and laborer income to decline for a second consecutive year*. 7 pp.
8. Gamboa H, Urías C. 2014. *Implementación de un modelo piloto del sistema de alerta temprana (SAT) para la roya del café en la región de OIRSA*. San Salvador: OIRSA. 70 pp.
9. Gamboa H, Urías C. 2014. *Método de muestreo de la incidencia de la roya del café para la región del OIRSA*. San Salvador: OIRSA. 34 pp.
10. Gamboa H, Urías C. sf. *Establecimiento de parcelas centinelas para la roya del café Hemileia vastatrix para la región del OIRSA*: OIRSA. 17 pp.
11. Garnier M, Bove J. 1997. Recent developments in vascular-restricted, walled bacteria of citrus: *Xylella fastidiosa* and the liberobacters, proteobacterial plant pathogens. *Fruits* 52: 361-69
12. Hershman DE, Sikora EJ, Giesler LJ. 2011. Soybean Rust PIPE: Past, Present, and Future. *Journal of Integrated Pest Management* 2: D1-D7
13. Hodson DP, Nazari, K., Park, R.F., Hansen J, Lassen P, et al. 2011. Putting Ug99 on the map: an update on current and future monitoring. In *BGRI Technical Workshop*, pp. 3-13
14. Kushalappa AC, Chaves GM. 1978. Uma escala para estimar a intensidade foliar de ferrugem do cafeeiro. *Fitopatologia Brasileira* 3: 119
15. Kushalappa AC, Ludwig A. 1982. Calculation of apparent infection rate in plant diseases development of method to correct for host growth. *Phytopathology* 72: 1373-77
16. Macchiavelli RE, Rodríguez RdP. 2000. Methods for efficient estimation of rust incidence in coffee plantations. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 84: 65-78
17. Madden LV, Hughes G. 1999. Sampling for plant disease incidence. *Phytopathology* 89: 1088-103
18. Madden LV, Hughes G, van den Bosch F. 2017. Estimating Plant Disease by Sampling. In *The Study of Plant Disease Epidemics*, ed. LV Madden, G Hughes, F van den Bosch, pp. 279-318: The American Phytopathological Society
19. Madden LV, Hughes G, van den Bosch F. 2017. Measuring Plant Diseases. In *The Study of Plant Disease Epidemics*, ed. LV Madden, G Hughes, F van den Bosch, pp. 11-31: The American Phytopathological Society
20. McCook S, Vandermeer J. 2015. The Big Rust and the Red Queen: Long-term perspectives on coffee rust research. *Phytopathology* 105: 1164-73
21. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. 2018. *Action PPlan Xylella fastidiosa 2017-2018*: Ministère de la l'Agriculture et de l'Alimentation - République Française. 36 pp.



22. Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, González-Gómez R, López-Javier MA, López-Buenfil A, et al. 2017. Situación actual del programa de vigilancia epidemiológica fitosanitaria del cafeto y su aplicación en la prevención y control de roya. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35 Suplemento: S22-S27
23. Olivera P, Newcomb M, Szabo LJ, Rouse M, Johnson J, et al. 2015. Phenotypic and genotypic characterization of race TKTF of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* that caused a wheat stem rust epidemic in Southern Ethiopia in 2013-14. *Phytopathology* 105: 917-28
24. Pretorius ZA, Singh RP, Wagoire WW, Payne TS. 2000. Detection of virulence to wheat stem rust resistance gene Sr31 in *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* in Uganda. *Plant Disease* 84: 203-03
25. Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF). 2006. NIMF n.º5 Glosario de términos fitosanitarios. In *Normas internacionales para medidas fitosanitarias n.º 1 a 24 (edición de 2005)*, pp. 45-65: FAO
26. Secretariat of the International Plant Protection Convention. 2018. *ISPM 6. Surveillance*. Roma: FAO. 14 pp.
27. Sikora EJ, Allen TW, Wise KA, Bergstrom G, Bradley CA, et al. 2014. A Coordinated Effort to Manage Soybean Rust in North America: A Success Story in Soybean Disease Monitoring. *Plant Disease* 98: 864-75
28. Silva-Acuña R, Maffia LA, Zambolim L, Berger RD. 1999. Incidence-severity relationships in the pathosystem *Coffea arabica* *Hemileia vastatrix*. *Plant Disease* 83: 186-88
29. Singh RP, Hodson DP, Jin Y, Lagudah ES, Ayliffe MA, et al. 2015. Emergence and spread of new races of wheat stem rust fungus: Continued threat to food security and prospects of genetic control. *Phytopathology* 105: 872-84
30. Stern V, Smith R, van den Bosch R, Hagen K. 1959. The integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid: The integrated control concept. *Hilgardia* 29: 81-101
31. Treminio E. 2019. *Estimación de la eficiencia de métodos territoriales de muestreo de la roya del café (Hemileia vastatrix) en Honduras, El Salvador, Panamá y República Dominicana*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 73 pp.
32. Welter SC, Freeman R, Farnham DS. 1991. Recovery of 'Zinfandel' grapevines from feeding damage by Wilamette spider mite (Acari: Tetranychidae) - Implications for economic injury levels studies in perennial crops. *Environmental Entomology* 20: 104-09